DOI：10.14005/j.cnki.issn1672-7673.20230320.006

奇台低频射电阵列在 18~50 MHz 首次探测到 II 型射电暴

杨文军[1,2]，王 震[1,2]，平劲松[3,4]，严发宝[5]，路 光[5]，王明远[3,4]，沈玉梅[4]，许丙强[5]，白 宇[5]

（1. 中国科学院新疆天文台，新疆 乌鲁木齐 830011；2. 新疆射电天体物理重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830011；3. 中国科学院大学天文与空间科学学院，北京 100049；4. 中国科学院国家天文台，北京 100101；5. 山东大学威海校区，山东 威海 264209）

摘要：II 型射电暴是日冕物质抛射(Coronal Mass Ejections，CME)的最佳示踪器，当日冕物质抛射的速度超过本地阿尔芬速度时，会产生日冕激波或行星际激波，并对地球的磁层产生十分剧烈的影响，在射电波段观测到 II 型射电暴也就意味着观测到了日冕激波，预测激波到达地球的时间，是空间天气预报的重要内容之一。2021 年 9 月 28 日 06：20 UT 左右，奇台低频射电阵列(Qitai Low-Frequency Radio Array，Qitai LFRA)首次探测到一次 II 型射电暴爆发事件，频率覆盖范围为 18~50 MHz，持续时间 10 多分钟。由于在极低频(<40 MHz)频段还没有进行过具有有效空间分辨率的观测，未来在这个频段发现未知现象的可能性极大。观测结果表明，奇台低频射电阵列性能良好(增益典型值 6 dBi)、灵敏度高(-78 dBm/125 kHz，动态范围 72 dB)，可以在 25 周太阳活动峰年发挥独特作用。

关键词：II 型射电暴；日冕物质抛射；奇台低频射电阵列；极低频

中图分类号：P162.1 **文献标识码**：A **文章编号**：1672-7673(2023)03-0227-07

极低频是现代天文观测一个十分重要的频段，也是日冕外层到日地行星际空间射电爆发、木星射电爆发、月球空间和地球中高层大气低色散快速射电爆发的主要频段，通过该频段的探测可以开展太阳爆发、恒星形成、星系演化和宇宙早期状态等多项科学研究。极低频射电数据携带着太阳爆发运动过程和粒子加速与辐射的丰富信息，因此，在这个频段探测射电暴将加深人们对太阳日常活动的物理机制的认识。

1 II 型射电暴简介

太阳射电爆发事件是射电天文最早研究的现象之一。辐射频率范围从几十 kHz(地球附近)到上百 GHz(太阳色球)。由于射电辐射的强度、频率、谱形等和辐射源区的磁场、等离子体、能量粒子的性质密切相关，射电爆发和有关观测成为认识太阳大气动力学，特别是耀斑和日冕物质抛射等太阳爆发过程的一种独特和有效的诊断工具。太阳射电爆发根据爆发的频率分为微波爆发和射电暴，一般把频率高于 1 GHz 的爆发称为微波爆，低于 1 GHz 称为射电暴。一般可以将几百 MHz 以下的太阳射电暴分为 I，II，III，IV 和 V 5 种类型[1-2]。图 1 给出了这 5 种类型太阳射电暴的特征示意图，其中，II 型射电暴具有慢速频率漂移的特征，通常频率漂移速度小于等于 1 MHz/s，带宽较窄(几百兆)，持续时

基金项目：SKA 专项（2020SKA0110300）；新疆维吾尔自治区重点实验室开放课题（2023D04058）；国家自然科学基金（11941003）；中国科学院西部青年学者基金（2020-XBQNXZ-019）和中国新疆维吾尔自治区 2018 年度“天池百人计划”项目资助.

收稿日期：2023-01-11；修订日期：2023-02-05

作者简介：杨文军，男，高级实验师，主要研究射电天文. Email：yangwj@xao.ac.cn.

间约为 5~10 min，可能是激波加速电子的基频和谐频辐射。

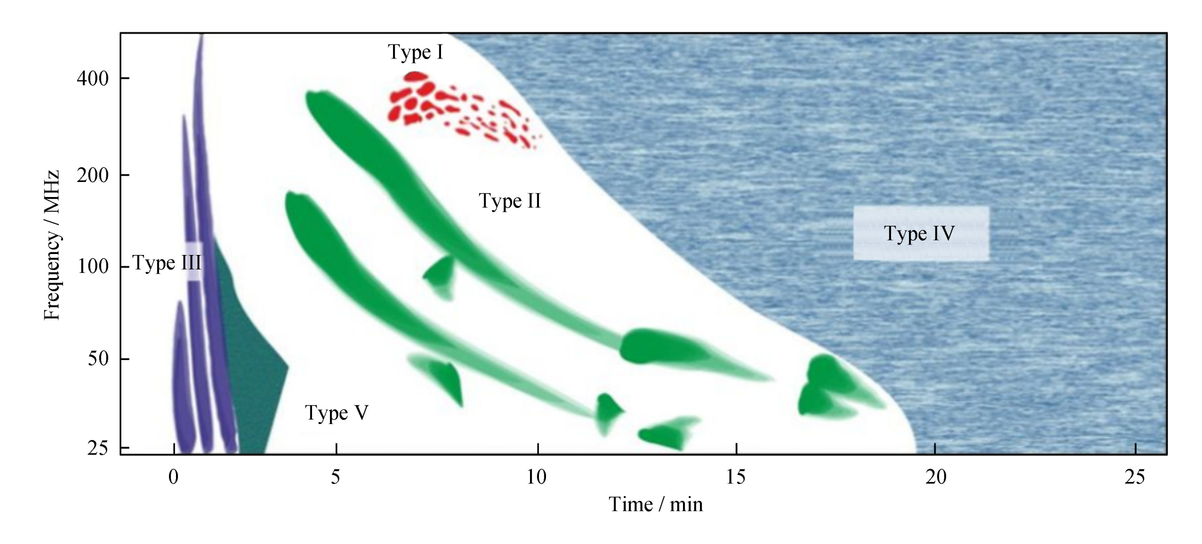


图 1　I~V 型太阳射电暴的射电动态谱示意图

Fig. 1　Radio dynamic spectrum diagram of type I-V solar radio bursts

有些 II 型暴的频谱形态比较丰富，存在多种精细结构，这些精细结构可以用于诊断电子数密度、磁场强度、位形等日冕参数，确定相关激波速度、距日距离等，以及更深入地理解太阳爆发过程[3]。太阳射电暴中的射电精细结构反映了太阳爆发时日冕中微小的能量释放过程和日冕磁场小尺度变化过程[4]。目前对于 II 型暴精细结构的成因仍然存在许多问题，需要进一步研究，尤其需要利用我国新建设备的高分辨率数据开展研究。利用地基望远镜观测到的米波 II 型射电暴的频率漂移可以计算日冕激波的速度，进而预测激波到达地球时间等重要的物理参数，II 型暴在研究太阳爆发驱动激波、激波加速产生能量电子的物理过程以及对灾害性空间天气的预警预报具有重要的实用价值。

2　国内外低频射电观测设备及台站

20 世纪 40 年代末，英国、法国和澳大利亚等国家陆续开展了低频射电观测，这一时期地基低频射电观测进入了一个高速发展阶段[5]。澳大利亚从 1958 年开始先后建立了一系列低频射电阵列[6]，利用这些低频天线观测的数据产出了一大批科研成果，如发现了月球表面凹凸不平的地形、木星爆发机制以及第 1 幅银河系极低频射电等高图[7]等，为后来低频射电天文发展奠定了基础。2019 年 1 月 3 日，搭载极低频射电频谱仪[8-9]（工作频率 0.1~40 MHz）的“嫦娥 4 号”卫星成功在月球背面软着陆，实现了中国对极低频射电空间观测的突破。目前，国外比较具有代表性的低频观测设备是欧洲荷兰的低频天线阵列 LOFAR（The Low-Frequency Array，30~240 MHz）、美国的长波长阵 LWA（The Long Wavelength Array，10~88 MHz），国内低频观测设备及台站主要有新建成的四川稻城太阳射电成像望远镜（150~450 MHz）、21CMA 和天籁阵列、内蒙古明安图观测站（30~70 MHz）、贵州 FAST（Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope，70~3 000 MHz）、云南天文台（70~700 MHz）、山东大学槎山太阳射电观测站（100~500 MHz）等。另外，还有中国参与的国际项目 SKA-low（Square Kilometre Array-low，50~350 MHz）。

3　奇台低频射电阵列介绍

3.1　奇台低频射电阵列选址和建设情况

2020 年 5 月开始进行奇台低频射电阵列的选址工作，综合考虑地形地貌、电磁环境、附近供电

设施以及避雷措施等，最终选定在奇台观测站内风塔正南方向大约 100 m 的位置，2020 年 10 月动工，2021 年 8 月 23 日初步完工。奇台低频射电阵列地理位置为北纬 43°36′，东经 89°41′，海拔 1 675.90 m，占地面积大约 900 m^2，位于新疆昌吉州奇台县半截沟镇石河子村新疆天文台奇台观测站内，距离乌鲁木齐 260 km，四面环山，气候干燥少雨，周边人口密度小，是中国科学院新疆天文台即将开工建设的 110 m 口径射电望远镜项目的建设台址，无线电电磁环境优良、干扰小，视野开阔，也是低频射电观测极佳的地点。

3.2　奇台低频射电阵列天线介绍

奇台低频射电阵列由 4 组共 8 个对数周期天线组成，每组包含两个天线，主要功能是对信号进行捕捉、选频、放大，具体性能指标见表 1。图 2 为奇台低频射电阵列的现场图，中央白色房子为设备机房，正南、正北方向各有一组天线，每组两个天线的夹角为 40°，正东、正西方向各有一组天线，每组两个天线的夹角为 60°。

表 1　天线主要性能指标

Table 1　Main performance parameters of the antenna

Index	Frequency range /MHz	Gain/dBi	VSWR	Polarization	Nominal impedance /Ω	F/B ratio /dB	Antenna dimension /mm	Rated wind velocity /(m/s)
Parameter (due south)	15-70	15-25 MHz：1.8-3.0 25-40 MHz：3.0-6.0 40-70 MHz：≥6.0	≤2.0	Horizontal+Vertical	50	≥15	6 500×6 950	60
Parameter (due east, west and north)	10-210	10-20 MHz：1.5-3.0 20-35 MHz：3.0-7.0 35-210 MHz：≥7.0	≤2.0	Horizontal+Vertical	50	≥15	6 830×7 500	60

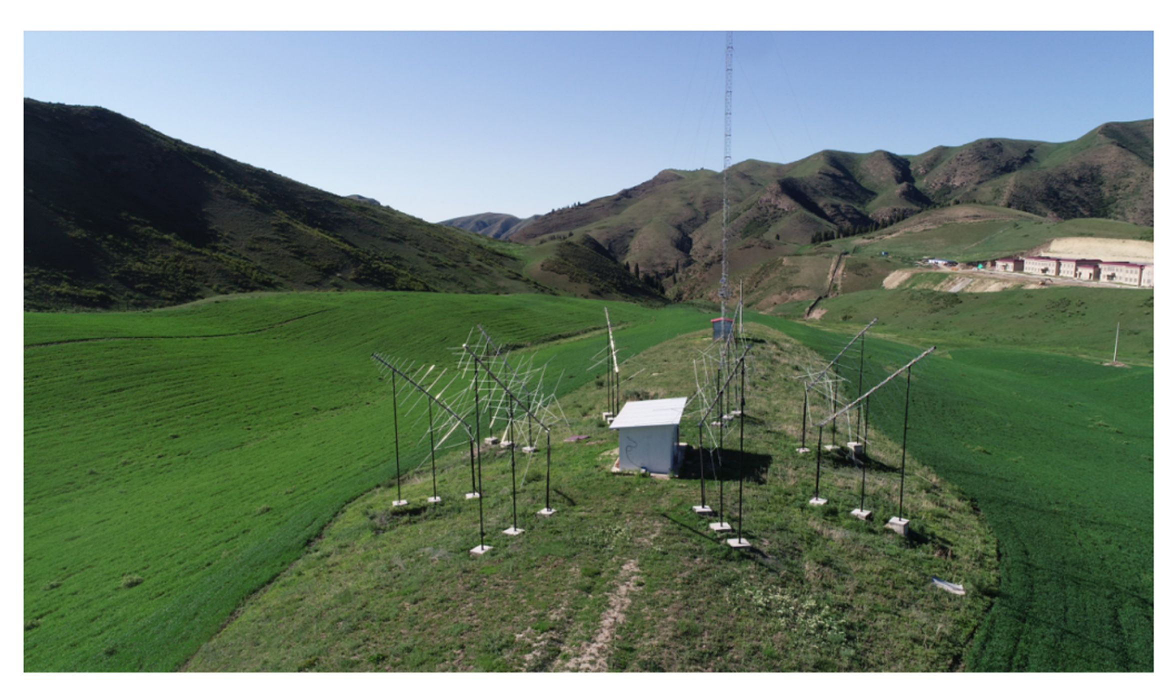


图 2　奇台低频射电阵列现场

Fig. 2　The scene of Qitai LFRA

3.3　奇台低频射电阵列观测系统

奇台低频射电阵列观测系统包括两个对数周期天线、对应的模拟信号前端滤波放大模块、模数转换器采集卡与数字信号处理模块、上位机处理与显示、数据存储等，如图 3。系统工作原理：天线接

收来自天空的低频信号，对信号进行初步放大、选频后，经过线缆进入模拟前端；模拟前端对 4 路(两路垂直极化，两路水平极化)进行合路，变为两路信号，然后对信号进行放大与滤波，输出可供模数转换器采集的适宜频率与功率信号，采集卡接收这些信号后，对它们进行数字信号处理，其中现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array，FPGA)可以对信号进行实时处理，最后将数据封装和存储；上位机根据需求完成频域和时域的切换、累加次数选择、时钟源选择以及画图和存储路径选择等；GNSS 天线接收卫星信号并输出给铷钟，由它完成时间同步并提供时间戳到数字信号处理单元；当数据量很大时，可以选择磁盘阵列服务器进行数据存储[10]。另外，通过因特网可以实现远程控制及数据文件的传输等工作。奇台低频射电阵列观测系统主要参数见表 2。

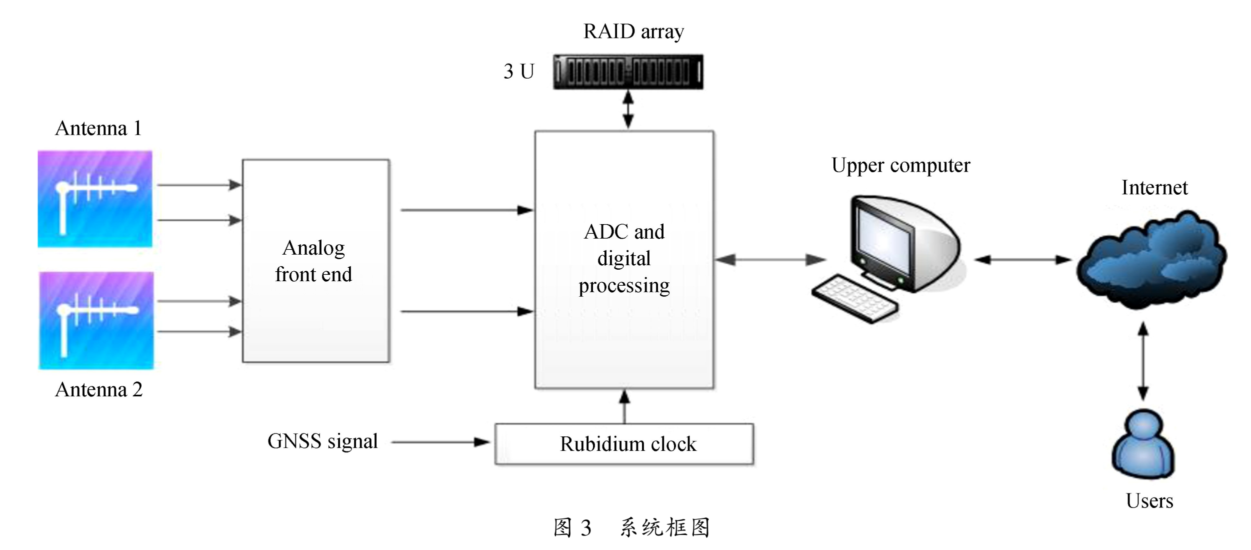


图 3 系统框图

Fig. 3 System block diagram

3.4 系统调试及观测数据结果

2021 年 5 月 28 日，奇台低频射电阵列正南方向的两个天线进入试观测运行阶段，16 bit 的模数转换器采集记录了很大的信号动态范围。在一开始观测的过程中，系统接收到除本地固定广播信号的干扰外，还发生了系统本身的验证串扰，经过尝试，最后通过去除通道 2 中的一级放大器(30 dB)以及在通道 1 中加高通滤波器(~25 MHz)，排除了串扰问题和大部分广播信号，获得了非常洁净的本底信号，之后的观测证实我们所做的这些尝试是非常有效的。2021 年 9 月 28 日 06:20 UT 左右，我们通过奇台低频射电阵列首次捕捉到了一次 II 型太阳射电暴爆发事件，频率覆盖范围 18~50 MHz，持续时间 10 多分钟，如图 4。此次爆发时间与澳大利亚 Learmonth 观测设备监测到的太阳射电暴事件时间基本吻合，如图 5。

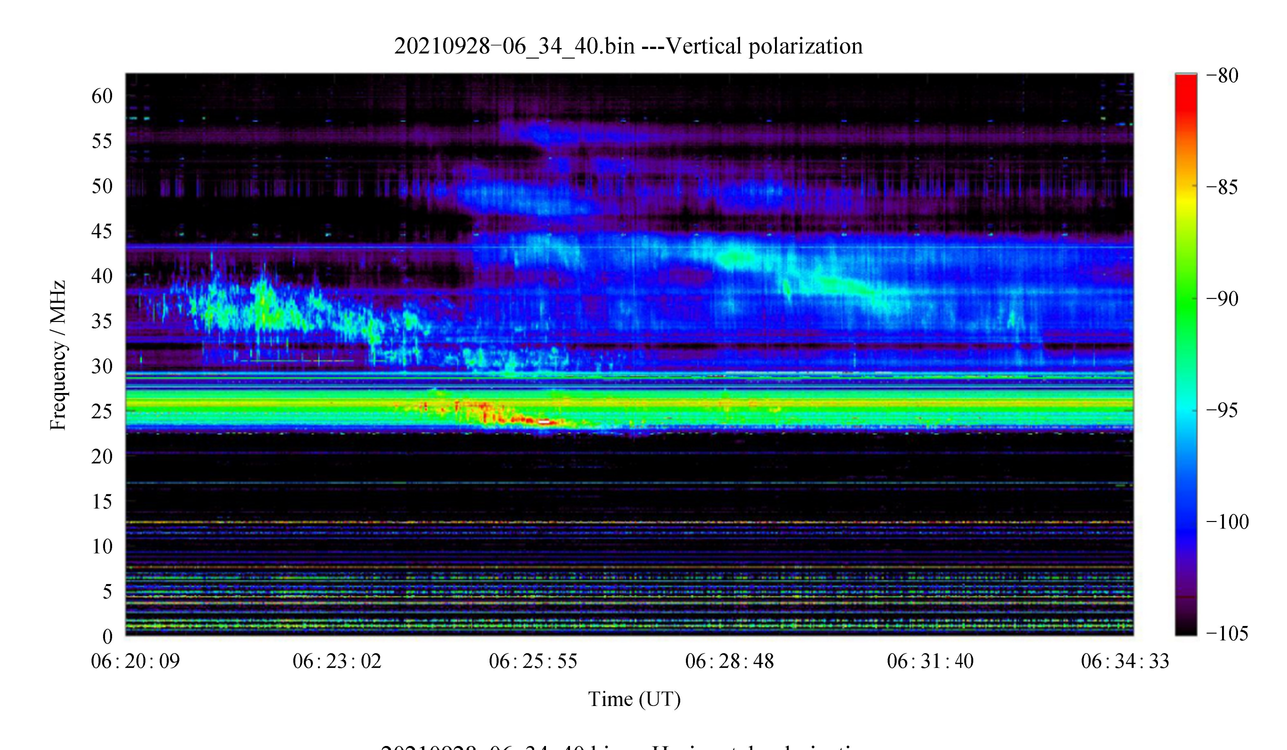
表 2 奇台低频射电阵列观测系统主要参数

Table 2 The main parameters of the Qitai LFRA observing system

Index	Parameter
System sensitivity	-78 dBm/125 kHz
System dynamic range	72 dB
Frequency resolution	15.3 kHz
Time resolution	0.5-32 ms

此次 II 型射电暴事件发生时，地球静止环境业务卫星(Geostationary Operational Environmental Satellite，GOES)在软 X 射线波段观测到了一个 C1.6 级的耀斑，该耀斑的开始、极大和结束时刻分别为 2021 年 9 月 28 日 05:54，06:34 和 09:00 UT；SOHO 卫星日冕仪于 06:24:05 UT 发现了日冕物质抛射结构，日冕仪所观测到日冕物质抛射的线性拟合速度约为 524 km/s(取自 NASA 官方网站发布的数据)。奇台低频射电阵列观测数据展现了 II 型射电暴的基频和二次谐频辐射，并具有分裂带的结构，基频结构的开始时间约为 06:20:10 UT，起始频率约为 40 MHz，约于 06:26:00 UT 时漂移到 25 MHz，由此计算 II 型射电暴在该时间段基频结构的漂移频率约为-0.04 MHz/s，结合 Newkirk 日冕密度模型[11]计算日冕物质抛射激波的速度约为 500 km/s，与澳大利亚 Learmonth 的观测数据所获得

基频漂移率和激波速度一致，与日冕仪所获得的激波速度也比较一致。另外，我们还注意到奇台低频射电阵列水平极化在低于 25 MHz 仍然观测到了 II 型射电暴的辐射带结构，但是漂移频率明显变慢，可能是激波传播过程的变化所致，其中的物理过程值得我们进一步研究，本文不做过多讨论。探测结果表明，奇台低频射电阵列可以对更低频率信号进行观测，这对全面解读天文事件机理具有更大的研究优势。



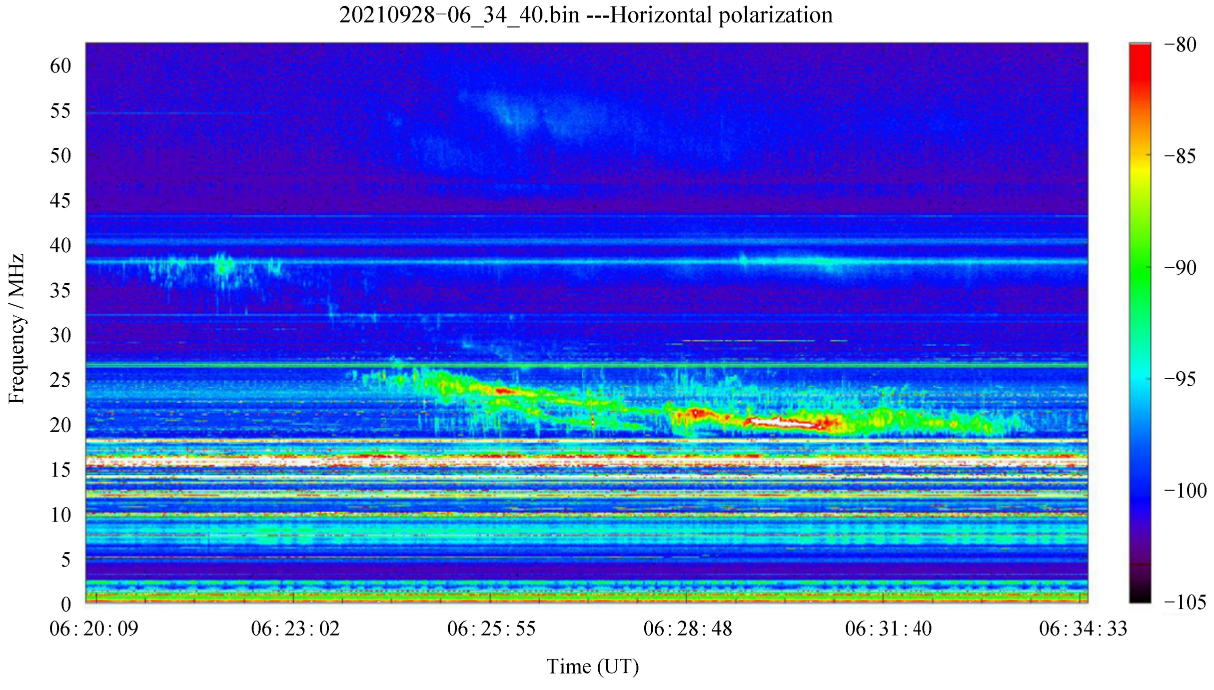


图 4 2021 年 9 月 28 日，06:20 UT 左右，奇台低频射电阵列首次探测到一次 II 型太阳射电暴事件，上图为通道 1(垂直极化)，下图为通道 2(水平极化)，频率分辨率 15.3 kHz，时间分辨率 0.5~32 ms

Fig. 4 One type II solar burst event was detected for the first time by Qitai LFRA at around 06:20 UT on September 28, 2021. Above is channel 1 (vertical polarization) and below is channel 2 (horizontal polarization) with a frequency resolution of 15.3 kHz and a time resolution of 0.5-32 ms

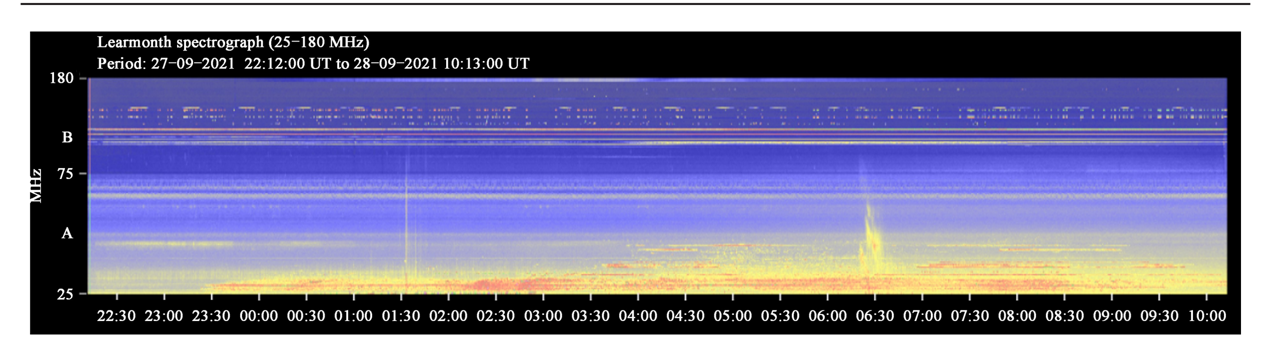


图 5 2021 年 9 月 28 日，06:20 UT 左右，澳大利亚 Learmonth 观测设备(25~180 MHz)监测到的太阳射电暴事件

Fig. 5 One solar radio burst event was detected by the Learmonth observatory (25-180 MHz) in Australia at around 06:20 UT on September 28, 2021

4 结论和展望

奇台低频射电阵列自运行以来，探测到了许多太阳射电暴事件以及其他外来信号，通过对数据处理和分析证明了该阵列设计新颖，性能优越，灵敏度高，覆盖天区范围大，在国际和国内低频射电观测领域，特别是对于极低频频段范围的观测具有极大的优势。今后可以将奇台低频射电阵列观测的数据与国内外其他低频观测站的数据进行比对，相互参考，互为补充，对人们利用极低频射电频段探测新的科学现象具有一定的帮助作用。我们期待 25 周太阳活动峰年能利用奇台低频射电阵列平台做出重要的科学贡献，以填补人类在极低频射电波段探测的空白。

参考文献：

[1] MCLEAN D J, LABRUM N R. Solar radiophysics: studies of emission from the sun at the metre wavelengths [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1985.

[2] 沈发新，高冠男，汪敏. 基于概率霍夫变换的太阳射电Ⅲ和Ⅱ型暴自动识别及参数提取[J]. 天文研究与技术，2022，19(6)：559-567.
SHEN F X, GAO G N, WANG M. Automatic identification and parameter extraction of solar type III and II radio burst based on probabilistic Hough transform [J]. Astronomical Research & Technology, 2022, 19(6): 559-567.

[3] 冯士伟，吕茂水. 太阳 II 型射电暴精细结构的观测研究 [J]. 天文学进展，2021，39(2)：129-143.
FENG S W, LYU M S. Recent observational studies on the fine structrues of solar type II radio bursts [J]. Progress in Astronomy, 2021, 39(2): 129-143.

[4] 高冠男，林隽，汪敏，等. 太阳米波和分米波 II 型、III 型射电暴及精细结构观测研究进展[J]. 天文学进展，2011，1(1)：35-47.
GAO G N, LIN J, WANG M, et al. Research and observation of and type III solar radio metric and decimetric type II bursts with fine structures [J]. Progress in Astronomy, 2011, 1(1): 35-47.

[5] BOONSTRA A J, GARRETT M, KRUITHOF G, et al. Discovering the sky at the longest wavelengths (DSL) [C] // Proceedings of the IEEE Aerospace Conference. 2016: 1-20.

[6] ORCHISTON W, GEORGE M, SLEE B, et al. The history of early low frequency radio astronomy in Australia. 1: the CSIRO division of radiophysics [J]. Journal of Astronomical History & Heritage, 2015, 18(1): 3-13.

[7] CANE H V, WHITHAM P S. Observations of the southern sky at five frequencies in the range 2-20 MHz [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1977, 179: 21-29.

[8] 张韬, 苏彦. 嫦娥四号低频射电频谱仪降低背景噪声方法的研究 [J]. 天文研究与技术, 2019, 16(3): 312-320.

ZHANG T, SU Y. Research of the method for reducing background of very low frequency spectrumon Chang'E-4 [J]. Astronomical Research & Technology, 2019, 16(3): 312-320.

[9] 梅丽, 苏彦, 周建锋. 极低频射电天文观测现状与未来发展 [J]. 天文研究与技术, 2018, 15(2): 127-139.

MEI L, SU Y, ZHOU J F. The history and development of the low-frequency radio observation [J]. Astronomical Research & Technology, 2018, 15(2): 127-139.

[10] 许丙强, 白宇, 路光, 等. 10～50 MHz 地基低频射电天文数字接收机及上位机软件研制 [J]. 地球物理学报, 2023, 66(3): 891-904.

XU B Q, BAI Y, LU G, et al. Development of 10-50 MHz ground based low frequency radio astronomical digital receiver and PC software [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2023, 66 (3): 891-904.

[11] SMERD S F, SHERIDAN K V, STEWART R T. Split-band structure in type II radio bursts from the sun [J]. The Astrophysical Letter, 1975, 116: 23-28.

Type II Radio Burst was Detected for the First Time by Qitai LFRA at 18-50 MHz

Yang Wenjun[1,2], Wang Zhen[1,2], Ping Jinsong[3,4], Yan Fabao[5], Lu Guang[5], Wang Mingyuan[3,4], Shen Yumei[4], Xu Bingqiang[5], Bai Yu[5]

(1. Xinjiang Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China, Email: yangwj@xao.ac.cn;
2. Xinjiang Key Laboratory of Radio Astrophysics, Urumqi 830011, China;
3. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
4. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;
5. Shandong University, Weihai, Weihai 264209, China)

Abstract: Type II radio bursts are the best tracers of Coronal Mass Ejections (CME). The coronal or interplanetary shocks are generated along with a dramatic effect on the Earth's magnetosphere, when CME exceed the local Alfin velocity. The detection of type II radio bursts in the radio band manifests the generation of coronal shock waves. The prediction of the arrival time of shock waves to the Earth is essential to the space weather prediction. Type II radio burst was detected for the first time by Qitai low frequency (Qitai LFRA) at around 06:20 UT on September 28, 2021, with a frequency coverage of 18-50 MHz and a duration of more than 10 minutes. Since virtually no observation with effective spatial resolution have been made at extremely low frequency (<40 MHz) band, there is a great possibility to discover unknown phenomena at this band in future. Our observation shows that Qitai LFRA has good performance (Typical gain: 6 dBi) and high sensitivity (-78 dBm/125 kHz, DR: 72 dB), and can play a unique role in the 25th annual solar activity peak.

Key words: type II radio burst; CME; Qitai LFRA; extremely low frequency